

This Page Is Inserted by IFW Operations  
and is not a part of the Official Record

## **BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning documents *will not* correct images,  
please do not report the images to the  
Image Problem Mailbox.**

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**

BI

(19)



Europäisches Patentamt

European Patent Office

Office européen des brevets



(11)

EP 0 856 737 A1

(12)

# EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(43) Veröffentlichungstag:

05.08.1998 Patentblatt 1998/32

(51) Int. Cl.<sup>6</sup>: G01R 15/24

(21) Anmeldenummer: 97811023.7

(22) Anmeldetag: 24.12.1997

(84) Benannte Vertragsstaaten:

AT BE CH DE DK ES FI FR GB GR IE IT LI LU MC  
NL PT SE

Benannte Erstreckungsstaaten:

AL LT LV MK RO SI

(30) Priorität: 29.01.1997 DE 19703128

(71) Anmelder: ABB RESEARCH LTD.  
8050 Zürich (CH)

(72) Erfinder:

- Bohnert, Klaus, Dr.  
5443 Niederrohrdorf (CH)
- Brändle, Hubert, Dr.  
8102 Oberengstringen (CH)
- Schanke, Tone  
0380 Oslo (NO)

(74) Vertreter: Weibel, Beat et al  
Asea Brown Boveri AG  
Immaterialgüterrecht (TEI)  
Haselstrasse 16/699 I  
5401 Baden (CH)

## (54) Magneto-optischer Stromsensor

(57) Ohne besondere Maßnahmen sind eine faser-optische Stromsenserspule (11) und faseroptische  $\lambda/4$ -Verzögerungsglieder (9, 9'), die zu der Stromsenserspule (11) in Reihe geschaltet sind, temperaturabhängig bezüglich einer relativen Phasenverzögerung eines durchgehenden Lichtes. Um eine Temperaturkorrektur oder -Kompensation zu vermeiden, wird die Stromsenserspulen (11) getempert, so daß praktisch keine mechanischen Spannungen in deren optischer Faser verbleiben. Vorzugsweise ist die Stromsenserspule (11)

ohne Schutzmantel in einer mit einem Schutzgas gefüllten Kapillare (20) zwanglos gelagert. Die Kapillare (20) ist gasdicht in eine Vergußmasse (22) aus Polyurethan eingebettet und somit auch mechanisch geschützt. Die Doppelbrechung in faseroptischen  $\lambda/4$ -Verzögerungsgliedern (9, 9') wird durch eine elliptische Form deren Kerns verursacht; sie ist damit weitgehend temperatur-unabhängig.

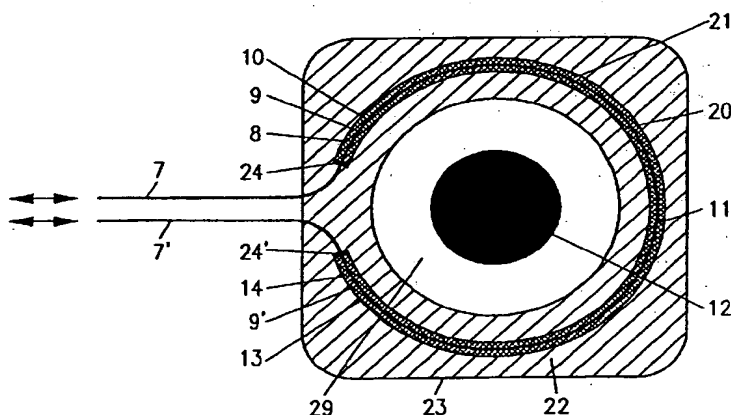


FIG.2

EP 0 856 737 A1

## Beschreibung

### TECHNISCHES GEBIET

Bei der Erfindung wird ausgegangen von einem magnetooptischen Stromsensor nach dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1.

### STAND DER TECHNIK

Mit dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1 nimmt die Erfindung auf einen Stand der Technik Bezug, wie er aus einer Veröffentlichung von K. Bohnert, H. Brändle und G. Frosio: FIELD TEST OF INTERFEROMETRIC OPTICAL FIBER HIGH-VOLTAGE AND CURRENT SENSORS, Tenth International Conference on OPTICAL FIBRE SENSORS, Glasgow, Scotland, 11 - 13 October 1994, S. 16 - 19, veröffentlicht durch SPIE-The International Society for Optical Engineering, Volume 2360, bekannt ist. Dort ist ein faseroptischer Stromsensor angegeben, bei dem Laserlicht über einen Faserkoppler und einen Faserpolarisator zu einem Y-Verzweiger gelangt, an dem es in 2 linear polarisierte Teilwellen aufgeteilt wird. Die 1. Welle läuft über einen Phasenmodulator, eine optische Glasfaser, welche die lineare Polarisation erhält, zu einer 1.  $\lambda/4$ -Faserschleife. In der Schleife wird die lineare in eine zirkulare Polarisation verwandelt. Das zirkular polarisierte Licht durchläuft eine faseroptische Sensorspule mit einem Durchmesser von 42 cm und 20 Windungen, die eine relativ geringe Doppelbrechung aufweist. Das aus der Sensorspule austretende, im Idealfall immer noch zirkular polarisierte Laserlicht wird in einer 2.  $\lambda/4$ -Faserschleife wieder in linearpolarisiertes Licht zurückverwandelt und läuft über eine weitere polarisationserhaltende Glasfaser und den Phasenmodulator zum Y-Verzweiger zurück. Die 2. Teilwelle durchläuft den optischen Kreis mit den gleichen Polarisationszuständen in der entgegengesetzten Richtung. Im Y-Verzweiger werden beide zurückkehrenden Wellen zur Interferenz gebracht. Das resultierende Interferenzsignal gelangt über den Faserpolarisator und den Faserkoppler zu einer Photodiode. Das Magnetfeld des elektrischen Stroms, der von der Faserspule umschlossen wird, erzeugt eine optische Phasenverschiebung zwischen den beiden gegenläufigen Lichtwellen in der Spule. Die Phasenverschiebung wird als eine entsprechende Änderung des Interferenzsignals detektiert. Die biegeinduzierte, lineare Doppelbrechung der  $\lambda/4$ -Schleifen und damit die relative Phasenverzögerung sind temperaturabhängig. Ebenso ändert sich die lineare Doppelbrechung der Faserspule mit der Temperatur. Diese Effekte sind besonders bei tiefen Temperaturen ( $< 0^\circ\text{C}$ ) stark ausgeprägt, weil sich hier gewöhnlich der Plastikschutzmantel der Faser verhärtet und zusätzliche Doppelbrechung erzeugt. Die Folge ist eine Veränderung der Meßempfindlichkeit des Sensors. Diese Effekte zeigen oft ein hystereseartiges Verhalten,

so daß auch bei bekannter Temperatur eine exakte Korrektur dieses Signals kaum möglich ist.

In einem relativ eingeschränkten Temperaturbereich zwischen  $0^\circ\text{C}$  und  $70^\circ\text{C}$  ändert sich in dem beschriebenen Fall die relative Phasenverzögerung in der Sensorspule um ca.  $7^\circ$  und in der  $\lambda/4$ -Schleife um  $4^\circ$ . Bei einem Strom von 900 A und konstanter Temperatur betrug der relative Meßfehler  $\pm 0,15\%$ .

Aus der DE-AS 2445369 ist ein magnetooptischer Meßwandler für Hochspannungsstrommessungen bekannt, bei dem die als Stromsensor verwendete Lichtleitfaser aus Glas mit einem Innendurchmesser von  $57\text{ }\mu\text{m}$  einen Flüssigkern aus Hexachlorobuta-1,3-dien besitzt. Dadurch soll die bei Lichtleiterspulen aus Gradientenfasern stark temperaturabhängige Spinnungs Doppelbrechung behoben werden.

Aus der DE 4304762 A1 ist ein Sensorkopf für eine faseroptische Strommeßvorrichtung mit einem polarimetrischen Detektionsverfahren, ohne  $\lambda/4$ -Verzögerungselemente, bekannt, bei der eine verdrehte, um einen Stromleiter geführte niedrigdoppelbrechende LB-Faser aus Quarzglas im Innern einer Kapillare aus Quarz mit einem Durchmesser im Bereich von  $0,2\text{ mm}$  -  $0,5\text{ mm}$  angeordnet und endseitig praktisch kräftefrei an aufgeschmolzenen Spleißstellen gehalten ist. Die durch ihre Verdrehung hervorgerufene Torsionsspannung der LB-Faser wird über die Spleißstellen und über Klebeverbindungen, welche Silikon enthalten, auf die Kapillare übertragen. Ein üblicherweise die Sensorfaser umgebender Plastikschutzmantel kann sich jedoch bei niedrigen Temperaturen verhärten und eine störende Doppelbrechung verursachen. Das in die Sensorfaser eingeleitete Licht wird nicht gegenläufig geführt, so daß sich der Einfluß externer Störeffekte auf die Sensorfaser nicht kompensiert.

Zum einschlägigen Stand der Technik wird noch auf die Veröffentlichung von G. Frosio und R. Dändliker, Reciprocal reflection interferometer for a fiber-optic Faraday current sensor in: Applied Optics, Vol. 33, No. 25, 1. September 1994, S. 6111 - 6122, verwiesen. Dort ist die Sensorspule endseitig verspiegelt. Dabei treten die gleichen Temperaturabhängigkeiten wie bei dem Stromsensor in dem eingangs genannten Konferenzbericht auf.

### DARSTELLUNG DER ERFINDUNG

Die Erfindung, wie sie im Patentanspruch 1 definiert ist, löst die Aufgabe, einen magnetooptischen Stromsensor der eingangs genannten Art derart weiterzuentwickeln, daß dessen Temperaturabhängigkeit vernachlässigbar ist.

Vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung sind in den abhängigen Patentansprüchen definiert.

Ein Vorteil der Erfindung besteht darin, daß eine aufwendige Temperaturkompensation oder -Korrektur entfallen kann.

## KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

Die Erfindung wird nachstehend anhand von Ausführungsbeispielen erläutert. Es zeigen:

- Fig. 1 ein Sagnac-Interferometer mit  $\lambda/4$ -Verzögerungsgliedern und einer Stromsenserspule in einer Prinzipdarstellung,  
 Fig. 2 eine Anordnung der Stromsenserspule gemäß Fig. 1 in einem Gehäuse,  
 Fig. 3 Querschnitte von Glasfaserkernen und Lichtamplituden an einem Übergang von einer Zuleitungsfaser zu einem  $\lambda/4$ -Verzögerungsglied,  
 Fig. 4 ein Sagnac-Interferometer mit einem  $\lambda/4$ -Verzögerungsglied und einer endseitig verspiegelten Stromsenserspule in einer Prinzipdarstellung und  
 Fig. 5 die Temperaturabhängigkeit eines durch lineare Doppelbrechung verursachten Gangunterschiedes in einer getemperten Stromsenserspule.

## WEGE ZUR AUSFÜHRUNG DER ERFINDUNG

In den Figuren sind gleiche Teile mit gleichen Bezugszeichen gekennzeichnet.

Fig. 1 zeigt ein Sagnac-Interferometer mit einer Lichtquelle bzw. einem Mehrmodenlaser (1), der Licht über einen 1. Faserkoppler (2), einen 1. Lichtfaserspleiß (3) zu einem Faserpolarisator (4) sendet. Das aus dem Faserpolarisator (4) austretende, linear polarisierte Licht gelangt über einen 2. Lichtfaserspleiß (5) zu einem 2. Faserkoppler (6), wo es in 2 Teilwellen zerlegt wird. Die 1. Teilwelle läuft über eine polarisationserhaltende, optische Zuleitungsfaser (7) mit rundem oder vorzugsweise elliptischem Querschnitt des Faserkerns und einen 3. Lichtfaserspleiß (8) zu einem  $\lambda/4$ -Verzögerungsglied (9) aus einer weiteren optischen Lichtfaser mit einem stark elliptischen Querschnitt eines Faserkerns (31) mit einem typischen Hauptachsenverhältnis von 2 : 1. Aus diesem  $\lambda/4$ -Verzögerungsglied (9) tritt das Licht, zirkularpolarisiert über einen 4. Lichtfaserspleiß (10) in eine faseroptische Stromsenserspule (11) mit geringer linearer Doppelbrechung aus einem magneto-optisch aktiven Material, wie z. B. Quarzglas, ein, welche mehrere Windungen um einen Stromleiter (12) aufweist. Aus dieser Stromsenserspule (11) tritt das zirkular polarisierte Licht über einen 5. Lichtfaserspleiß (13) in ein 2.  $\lambda/4$ -Verzögerungsglied (9') ein, das gleich dem  $\lambda/4$ -Verzögerungsglied (9) ist. Aus diesem  $\lambda/4$ -Verzögerungsglied (9') austretendes Licht ist wieder linear polarisiert und gelangt über einen 6. Lichtfaserspleiß (14), über eine polarisationserhaltende optische Rückleitungsfaser (7') mit rundem oder vorzugsweise elliptischem Querschnitt des Faserkerns und über einen piezoelektrischen Modulator bzw. Phasenmodulator (15) zum 2. Faserkoppler (6) zurück. Die 2., am Faser-

koppler (6) erzeugte Teilwelle durchläuft den optischen Kreis mit entsprechenden Polarisationszuständen in entgegengesetzter Richtung. Die beiden zurückkehrenden Wellen werden im 2. Faserkoppler (6) zur Interferenz gebracht. Das optische Interferenzsignal läuft über den 2. Lichtfaserspleiß (5), den Faserpolarisator (4), den 1. Lichtfaserspleiß (3) und den 1. Faserkoppler (2) zu einem Lichtdetektor bzw. einer Photodiode (16). Die Photodiode (16) liefert ausgangsseitig ein zur empfangenen Lichtintensität proportionales Lichtintensitätssignal (S16) einem Signalprozessor (17), der ausgangsseitig ein Stromsignal (18) als Meßergebnis zur Verfügung stellt und ferner ein Modulationssignal (19) an den Phasenmodulator (15) liefert. Dieses Modulationssignal (19) hat eine Frequenz im Bereich von oberhalb 100 kHz; es dient zur Einstellung des Arbeitspunktes des Sagnac-Interferometers. Vorzugsweise wird eine Phasenverschiebung von 90° eingestellt, entsprechend halber Maximalintensität, bei der eine mittels der Stromsenserspule (11) erfaßte Phasenverschiebung eine möglichst große Änderung des Lichtintensitätssignals (S16) bewirkt.

Die die optische Phasenverzögerung verursachende Doppelbrechung im  $\lambda/4$ -Verzögerungsglied (9, 9') ist durch die elliptische Form des Kernquerschnittes (31) bedingt. Da die Kernform temperaturunabhängig ist, ist ebenfalls die Phasenverzögerung temperaturunabhängig, d. h., das aus den  $\lambda/4$ -Verzögerungsgliedern (9, 9') austretende Licht ist, unabhängig von der Temperatur, stets zirkular polarisiert.

Verwendet man Zu- und Rückleitungsfasern (7, 7') mit einem runden Kern statt mit einem elliptischen, so muß die für die Polarisationserhaltung notwendige Doppelbrechung durch ein eingefrorenes, internes mechanisches Spannungsfeld erzeugt worden sein.

Fig. 2 zeigt ein um den Stromleiter (12) angeordnetes, innen hohles Sensorgehäuse (23), in welchem eine Stromsenserspule (11) mit einem Faserdurchmesser von etwa 80  $\mu\text{m}$  mit nur einer Windung innerhalb eines Hohlraumes (21) einer kreisförmig gebogenen Kapillare (20) aus Quarzglas oder einer chromreichen Stahlliegierung, wie z. B. Inconel, zwanglos, d. h. mechanisch spannungsfrei, gelagert ist. Der Stromleiter (12) ist dabei in einer zentralen Durchlaßöffnung (29) des Sensorgehäuses (23) angeordnet. Die Stromsensorfaser der Stromsenserspule (11) wird zunächst mit ihrem Schutzmantel mit Hilfe von Stickstoffgas unter hohem Druck in die Kapillare (20) hineingepreßt. Anschließend wird Alkohol in die Kapillare (20) gepreßt, der den Schutzmantel von der magneto-optischen Stromsensorfaser ablöst, so daß der Schutzmantel als Ganzes aus der Kapillare (20) gezogen werden kann, wobei die nackte Stromsensorfaser in der Kapillare (20) zurückbleibt. Die Stromsensorfaser der Stromsenserspule (11) wird nun vor dem Einbau in das Sensorgehäuse (23) in ihrem eingelegten und kreisförmig gekrümmten Zustand bei ihrer Erweichungstemperatur von etwa 830 °C während mehr als 3 h getempert, damit sie weitge-

hend frei von mechanischen Spannungen wird und somit wenigstens annähernd frei von linearer optischer Doppelbrechung ist. Nach dem Tempern und dem Anbringen der  $\lambda/4$ -Verzögerungsglieder (9, 9') sowie der Zu- und Rückleitungsfasern (7, 7') wird der Hohlraum (21) mit einem Schutzgas, vorzugsweise  $\text{SF}_6$ , gefüllt und durch Dichtungen (24, 24') z. B. aus Indium, Silber oder Gold gasdicht verschlossen, um zu verhindern, daß Feuchtigkeit und chemisch aggressive Dämpfe in das Innere der Kapillare (20) eindringen können. Innerhalb des Hohlraumes (21) sind auch die  $\lambda/4$ -Verzögerungsglieder (9) und (9') und Teile der optischen Zuleitungsfaser (7) sowie der Rückleitungsfaser (7') untergebracht. Die Kapillare (20) mit einem Innendurchmesser von einigen 100  $\mu\text{m}$  ist in einer Vergußmasse, wie sie für elektronische Bauteile üblich ist, z. B. aus Polyurethan oder aus einem Silikonschaumstoff, eingebettet; sie dient als Schutz gegen störende mechanische und chemische Einflüsse.

Es versteht sich, daß die Stromsensorspule (11) mehrere Windungen, entsprechend Fig. 1, aufweisen kann. Anstelle eines Schutzgases könnte auch Öl oder Vakuum im Hohlraum (21) sein. Bei Verwendung von Öl kann die Kapillare (20) aus einem Kunststoff bestehen und nach dem Tempern über die Lichtfaser der Stromsensorspule (11) geschoben werden. Die Aufgabe der Dichtungen (24, 24') kann auch durch die Vergußmasse (22) übernommen werden, wenn diese dafür geeignet ist.

Fig. 3 zeigt das nichtgekrümmte, lineare  $\lambda/4$ -Verzögerungsglied (9), das über die Lichtfaserpleiße (8) und (10) mit der optischen Zuleitungsfaser (7) bzw. mit der Stromsensorspule (11) verbunden ist, unten in einem Längsschnitt und darüber in Querschnitten durch die entsprechenden Kerne (30) bzw. (31) der optischen Fasern (7) bzw. (9). Um den Faserkern (31) der optischen Faser (9) befindet sich ein Glasmantel; der üblicherweise noch darüber befindliche Plastikschrutmantel wurde entfernt.

Mit (x) und (y) sind zueinander orthogonale Koordinatenachsen der optischen Zuleitungsfaser (7) mit elliptischem Kernquerschnitt in Richtung von deren Haupt- und Nebenachse bezeichnet und mit ( $E_y$ ) eine Lichtamplitude eines linearpolarisierten Lichtes (a), das durch die optische Zuleitungsfaser (7) polarisationserhaltend z. B. in Richtung der y-Achse übertragen wird. Mit (x') und (y') sind zueinander orthogonale Koordinatenachsen der Lichtfaser des  $\lambda/4$ -Verzögerungsgliedes (9) mit elliptischem Kernquerschnitt (31) in Richtung von deren Haupt- und Nebenachse bezeichnet und mit ( $E_{x'}$ ) und ( $E_{y'}$ ) Lichtamplituden in Richtung der x'- bzw. y'-Achse. Die Achsen (x') und (y') der Lichtfaser des  $\lambda/4$ -Verzögerungsgliedes (9) sind gegenüber den Achsen (x) und (y) der optischen Zuleitungsfaser (7) um  $45^\circ \pm \varepsilon$  gedreht, so daß das linearpolarisierte Licht (a) beim Übergang von der optischen Zuleitungsfaser (7) in das  $\lambda/4$ -Verzögerungsglied (9) in 2 zueinander orthogonale Komponenten. ( $E_{x'}$ ) und ( $E_{y'}$ ) parallel zu den optischen

Hauptachsen (x', y') des  $\lambda/4$ -Verzögerungsgliedes (9) zerlegt wird. Die beiden Polarisationskomponenten breiten sich mit unterschiedlicher Phasengeschwindigkeit aus. Die Länge des  $\lambda/4$ -Verzögerungsgliedes (9) wird so gewählt, daß die 2 Komponenten eine relative Phasenverzögerung von  $(2 \cdot m - 1) \cdot 90^\circ \pm \delta$  akkumulieren, wobei m eine ganze Zahl ist, so daß zirkularpolarisiertes Licht aus dem  $\lambda/4$ -Verzögerungsglied (9) austritt. Die Ordnung m des  $\lambda/4$ -Verzögerungsgliedes (9) sollte vorzugsweise = 1 betragen, da die Temperaturabhängigkeit mit zunehmender Ordnung ansteigt. Für Licht mit einer Wellenlänge von 780 nm beträgt die Länge des  $\lambda/4$ -Verzögerungsgliedes (9), abhängig vom Fasertyp, für m = 1 etwa 0,7 mm - 2 mm. Die Toleranzwinkel  $\varepsilon$  und  $\delta$  sollen vorzugsweise  $< 5^\circ$  bzw.  $< 10^\circ$  sein;  $\varepsilon$  darf allenfalls  $15^\circ$  betragen und  $\delta$  allenfalls  $25^\circ$ . Für ein  $\lambda/4$ -Verzögerungsglied (9) mit m = 1, das aus einer kommerziell erhältlichen Faser entnommen wurde, wurde für eine Lichtwellenlänge von 788 nm in einem Temperaturbereich zwischen  $-40^\circ\text{C}$  und  $80^\circ\text{C}$  eine tolerierbare Änderung (Abnahme) Phasenverzögerung um  $1,8^\circ$  gemessen. Diese verbleibende Temperaturabhängigkeit des  $\lambda/4$ -Verzögerungsgliedes (9) rührt u. a. von mechanischen Spannungen zwischen dessen Faserkern und Fasermantel (nicht dargestellt) her. Diese mechanischen Spannungen könnten noch durch eine Bestrahlung der Lichtfaser (9) mit ultraviolettem Licht und/oder durch eine Temperung bei einer Temperatur oberhalb von  $200^\circ\text{C}$  reduziert werden, was aber für die praktische Anwendung nicht notwendig ist.

Die Ausführung des  $\lambda/4$ -Verzögerungsgliedes (9') stimmt mit derjenigen des  $\lambda/4$ -Verzögerungsgliedes (9) überein. Die optischen Hauptachsen (x', y') der Verzögerungselemente (9) und (9') können bezüglich der Ebene der Stromsensorspule (11), deren Faserkern einen runden Querschnitt hat, beliebig ausgerichtet sein. Wichtig ist, daß die optischen Hauptachsen (x', y') der  $\lambda/4$ -Verzögerungsglieder (9, 9') mit den optischen Hauptachsen (x, y) der Zuleitungsfaser (7) und der Rückleitungsfaser (7') einen Winkel von  $45^\circ \pm \varepsilon$  oder  $45^\circ \pm \varepsilon$  bilden; wobei  $\varepsilon$  ein vorgebbare Toleranzwinkel von  $< 15^\circ$ , vorzugsweise von  $< 5^\circ$  ist. Die Länge des faseroptischen  $\lambda/4$ -Verzögerungsgliedes (9, 9') ist so zu wählen, daß die Polarisationskomponenten parallel zu den optischen Hauptachsen (x', y') in den  $\lambda/4$ -Verzögerungsgliedern (9, 9') einen Phasenunterschied von  $(2 \cdot m - 1) \cdot 90^\circ \pm \delta$  akkumulieren, wobei m eine ganze Zahl und  $\delta$  ein vorgebbare Toleranzwinkel von  $< 25^\circ$ , vorzugsweise von  $< 10^\circ$  ist.

Fig. 4 zeigt eine andere Ausführungsform eines Sagnac-Interferometers mit einem  $\lambda/4$ -Verzögerungsglied (9) gemäß den Fig. 1 - 3 und einer endseitig verspiegelten Stromsensorspule (11'), die in gleicher Weise gelagert und getempert ist wie die in Verbindung mit Fig. 1 und 2 beschriebene Stromsensorspule (11). Licht gelangt von dem Mehrmodenlaser (1) über den Faserkoppler (2) zu einem Faserpolarisator (25). Nach dem Faserpolarisator (25) wird das Licht an einem  $45^\circ$ -

Spleiß in 2 orthogonale Polarisationszustände aufgespaltet, die sich entlang der beiden Hauptachsen einer polarisationserhaltenden (stark doppelbrechenden) Lichtfaser (27) ausbreiten, an deren Anfang sich ein Phasenmodulator (26) befindet. Die beiden linearen, orthogonalen Polarisationszustände werden in dem  $\lambda/4$ -Verzögerungsglied (9) in 2 zirkulare Polarisationszustände mit gegenläufigem Drehsinn (links- und rechtszirkular polarisierte Wellen) verwandelt, welche einer Stromsenserspule (11) zugeführt werden. Nach Durchlaufen dieser Stromsenserspule (11) werden diese Lichtwellen an einer endseitigen Verspiegelung (28) reflektiert und laufen mit getauschten Polarisationszuständen zum Faserpolarisator (25) zurück, wo sie zur Interferenz gebracht werden. Die Interferenzintensität wird mit der Photodiode (16) gemessen. Der Faserpolarisator (25) kann gleich aufgebaut sein wie der Faserpolarisator (4) gemäß Fig. 1 und der Phasenmodulator (26) gleich wie der dortige Phasenmodulator (15). Die stark doppelbrechende optische Lichtfaser (27) ist so lang, daß darin die Kohärenz der beiden orthogonalen Polarisationszustände verlorengeht.

Wichtig ist, daß die Stromsensorenspulen (11) und (11') und vorzugsweise auch die  $\lambda/4$ -Verzögerungsglieder (9) und (9') wenigstens annähernd frei von mechanischen Spannungen und somit formstabil sind, so daß sie bezüglich ihrer Übertragungseigenschaften für Licht zumindest in dem vorgesehenen Anwendungsbereich nahezu temperaturunabhängig sind. Die Stromsensorenfasern der Stromsensorenspulen (11) und (11') behalten ihre gebogene Gestalt bei, wenn sie von den  $\lambda/4$ -Verzögerungsgliedern (9, 9') und den Zu- und Rückleitungsfasern (7, 7') getrennt würden. Ein doppelbrechungsinduzierter Gangunterschied (G), vgl. Fig. 5, soll  $< 20^\circ$ , vorzugsweise  $< 10^\circ$  sein.

Wichtig ist ferner, daß 2 Lichtwellen durch die Stromsensorenfasern der Stromsensorenspule (11, 11') geführt werden, da dadurch Störeffekte, wie sie z. B. durch mechanische Vibrationen hervorgerufen werden, teilweise kompensiert werden können.

Fig. 5 zeigt die Temperaturabhängigkeit eines durch die nach dem Tempern noch verbleibende lineare Doppelbrechung verursachten Gangunterschiedes (G) in Grad bei einer Stromsensorenspule (11) mit 7 Windungen und einem Durchmesser von 11,7 cm. Auf der Abszisse ist die Temperatur (T) in  $^\circ\text{C}$  aufgetragen. Die bei ansteigender Temperatur (T) gemessenen Werte des Gangunterschiedes (G) sind durch Kreise, die bei abnehmender Temperatur (T) gemessenen durch Punkte dargestellt. Ohne Temperung der Stromsensorenfaser betrug der gemessene, spannungsinduzierte Gangunterschied (G) etwa  $80^\circ$  (nicht dargestellt). Durch das thermische Ausheilen der mechanischen Spannungen in der Stromsensorenfaser ließ sich der Gangunterschied (G) auf einen fast temperaturunabhängigen Wert von 40 reduzieren, der so klein ist, daß er die Sensorgenauigkeit nicht beeinträchtigt.

## BEZEICHNUNGSLISTE

1	Lichtquelle, Mehrmodenlaser
2, 6	Faserkoppler
4, 25	Faserpolarisatoren
3, 5, 8, 10, 13, 14	Lichtfaserspleiße, Glasfaserverbindungen
7	optische Zuleitungsfaser mit elliptischem Kernquerschnitt 30
7'	optische Rückleitungsfaser mit elliptischem Kernquerschnitt
9, 9'	$\lambda/4$ -Verzögerungsglieder, optische Fasern mit elliptischem Kernquerschnitt 31, Einmodenfasern
11	faseroptische Stromsensorenspule mit magneto-optischer Stromsensorenfaser
11'	endseitig verspiegelte Stromsensorenspule
12	Stromleiter
15, 26	Phasenmodulatoren, piezoelektrische Modulatoren
16	Lichtdetektor, Photodiode
17	Signalprozessor
18	Stromsignal
19	Modulationssignal
20	Kapillare
21	Hohlraum von 20
22	Polyurethan, Silikonschaumstoff, Vergußmasse
23	Sensorgehäuse
24, 24'	Dichtungen von 20
27	stark doppelbrechende optische Faser
28	Spiegel, Verspiegelung
29	zentrale Durchlaßöffnung von 23
30	Kernquerschnitt von 7
31	Kernquerschnitt von 9
a	linarpolarisiertes Licht
b	zirkulärpolarisiertes Licht
$E_x, E_y, E_z$	Lichtamplitude in Richtung der $x'$ , $y'$ , $z'$ -Achse
G	Gangunterschied
S16	Lichtintensitätssignal
T	Temperatur
$x, x'; y, y'$	Koordinatenachsen

## Patentansprüche

### 1. Magneto-optischer Stromsensor

- a) mit mindestens einem  $\lambda/4$ -Verzögerungsglied (9, 9'),
- b) welches einerseits mit mindestens einer Stromsensorenspule (11, 11') mit einer magneto-optischen Stromsensorenfaser in optischer Verbindung steht,

- c) durch welche zirkularpolarisiertes Licht gegenläufig geführt ist, und  
d) welches andererseits mit einer polarisations-erhaltenden Zu- oder Rückleitungsfaser (7, 7') mit zueinander orthogonalen Hauptachsen (x, y) der Doppelbrechung in optischer Verbindung steht, dadurch gekennzeichnet,  
e) daß die Stromsensorfaser der mindestens einen Stromsenserspule (11, 11') ohne Schutzmantel in einer Kapillare (20) gelagert ist,  
f) daß diese Stromsensorfaser wenigstens annähernd frei von einer mechanischen Spannung ist,  
g) daß das mindestens eine  $\lambda/4$ -Verzögerungsglied (9, 9') eine wenigstens annähernd mechanisch spannungsfreie Einmodenfaser mit elliptischem Kernquerschnitt (31) ist,  
h) daß die optischen Hauptachsen (x', y') der  $\lambda/4$ -Verzögerungsglieder (9, 9') mit den optischen Hauptachsen (x, y) der Zuleitungsfaser (7) oder der Rückleitungsfaser (7') einen Winkel von  $45^\circ \pm \varepsilon$  oder  $-45^\circ \pm \varepsilon$  bilden, wobei  $\varepsilon$  ein vorgebbarer Toleranzwinkel ist, und  
i) daß die Länge des mindestens einen faser-optischen  $\lambda/4$ -Verzögerungsgliedes (9, 9') so gewählt ist, daß die Polarisationskomponenten parallel zu den optischen Hauptachsen (x', y') in dem mindestens einen  $\lambda/4$ -Verzögerungsglied (9, 9') einen Phasenunterschied von  $(2 \cdot m - 1) \cdot 90^\circ \pm \delta$  akkumulieren, wobei m eine ganze Zahl und  $\delta$  ein vorgebbarer Toleranzwinkel ist.
2. Magnetooptischer Stromsensor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der vorgebbare Toleranzwinkel  $\varepsilon < 15^\circ$  ist.
3. Magnetooptischer Stromsensor nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß der vorgebbare Toleranzwinkel  $\varepsilon < 5^\circ$  ist.
4. Magnetooptischer Stromsensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der vorgebbare Toleranzwinkel  $\delta < 25^\circ$  ist.
5. Magnetooptischer Stromsensor nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß der vorgebbare Toleranzwinkel  $\delta < 10^\circ$  ist.
6. Magnetooptischer Stromsensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Kapillare (20) Vakuum oder ein Schutzgas zum Schutz der Stromsensorfaser der mindestens einen Stromsenserspule (11, 11') vor Feuchtigkeit und/oder chemisch aggressiven Gasen enthält.
7. Magnetooptischer Stromsensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß auch das mindestens eine  $\lambda/4$ -Verzögerungsglied (9, 9') in der Kapillare (20) gelagert ist.
8. Magnetooptischer Stromsensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß eine lineare optische Doppelbrechung in der mindestens einen Stromsenserspule (11, 11')  $\pm 20^\circ$  nicht überschreitet.
9. Magnetooptischer Stromsensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß eine lineare optische Doppelbrechung in der mindestens einen Stromsenserspule (11, 11')  $\pm 10^\circ$  nicht überschreitet.



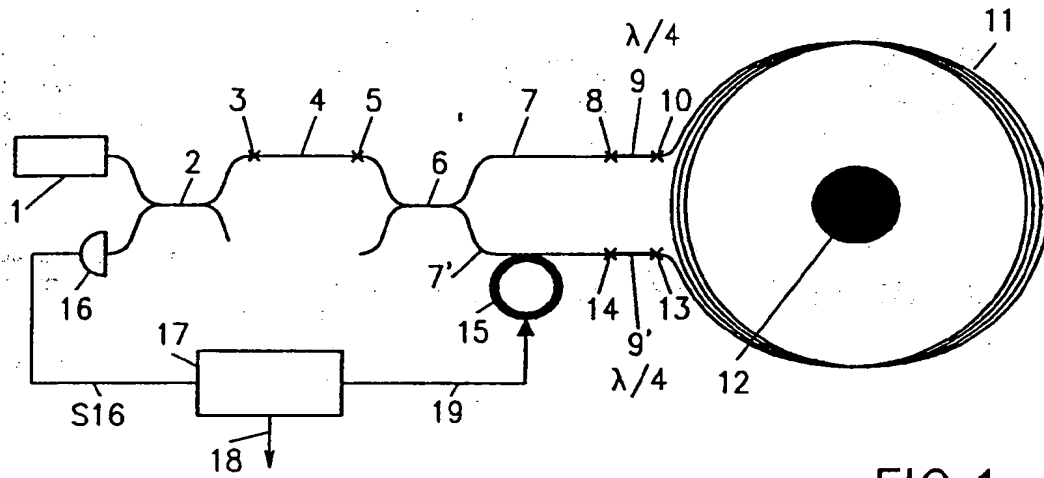


FIG. 1

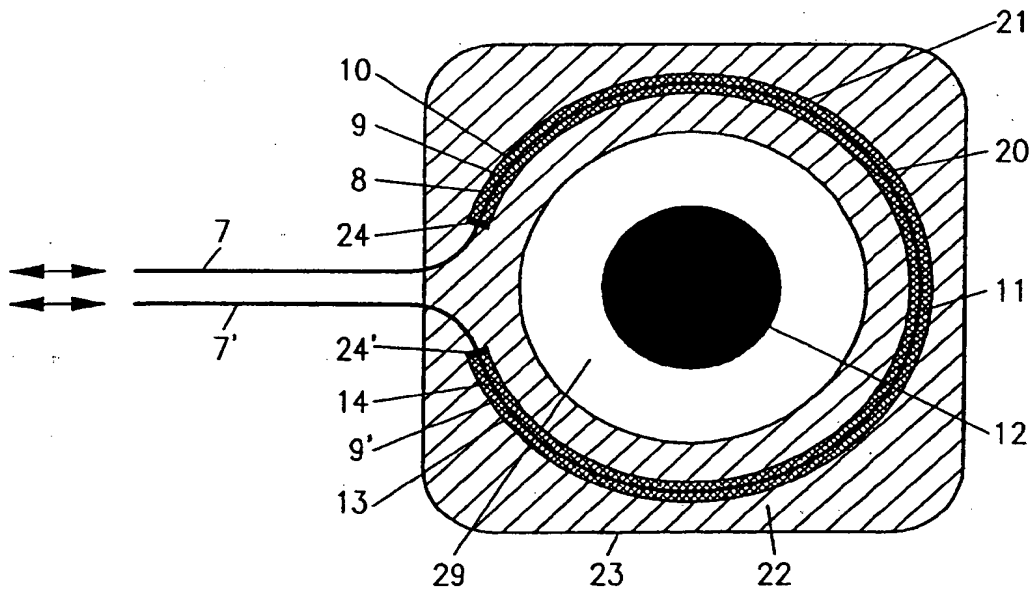


FIG. 2

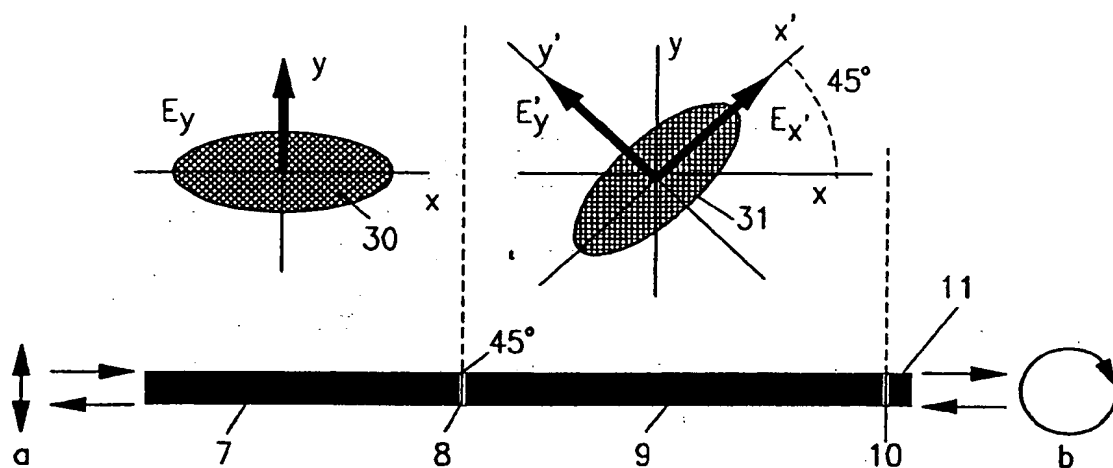


FIG. 3

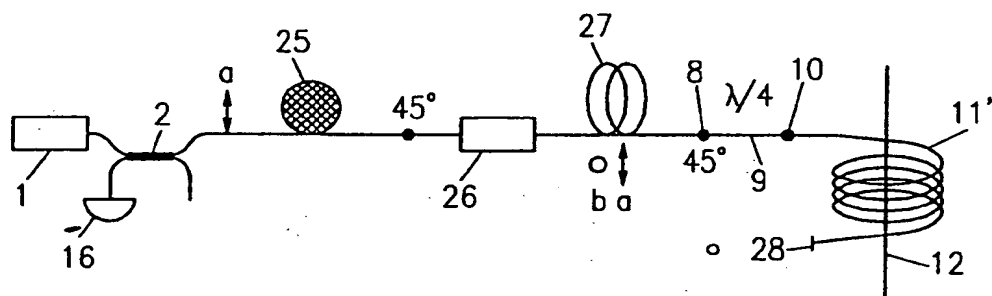


FIG. 4

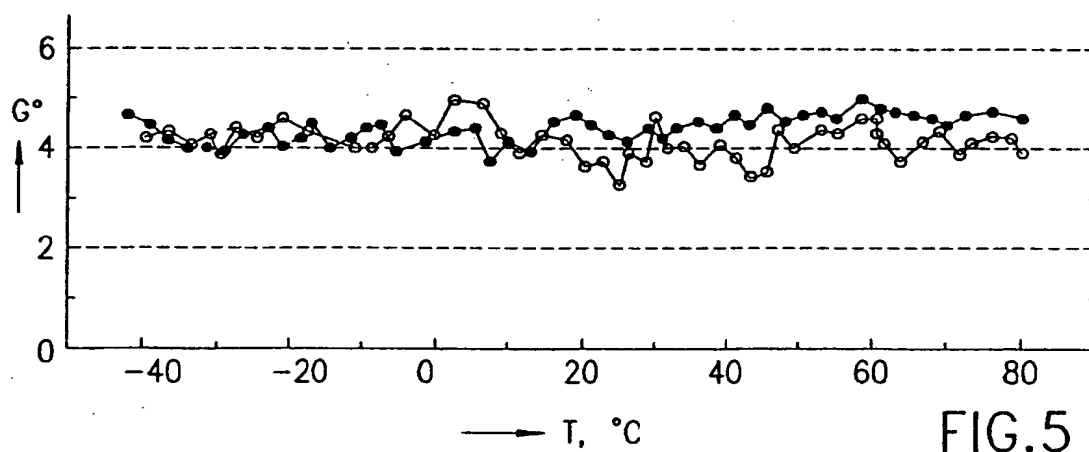


FIG. 5



Europäisches  
Patentamt

## EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung  
EP 97 81 1023

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (Int.Cl.6)
A	US 5 270 791 A (LEFEVRE ET AL.) 14.Dezember 1993 * Abbildung 1 *	1	G01R15/24
A	FR0510: "Reciprocal reflection interferometer for a fiber-optic Faraday current sensor" APPLIED OPTICS, Bd. 33, Nr. 25, 1.September 1994, WASHINGTON, DC,US, Seiten 6111-6121, XP000473296 * Abbildung 1B *	1	
A	EP 0 477 415 A (ASEA BROWN BOVERI AG) 1.April 1992 * Zusammenfassung *	1	
A	EP 0 613 017 A (GEC ALSTOHM T & D BALTEAU) 31.August 1994 * Zusammenfassung *	1	
			RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (Int.Cl.6)
			G01R
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort DEN HAAG		Abschlußdatum der Recherche 28.April 1998	Prüfer Lut, K
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : mündliche Offenbarung P : Zwischenliteratur T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument			

EPO FORM 1503 03/82 (P04C03)

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**